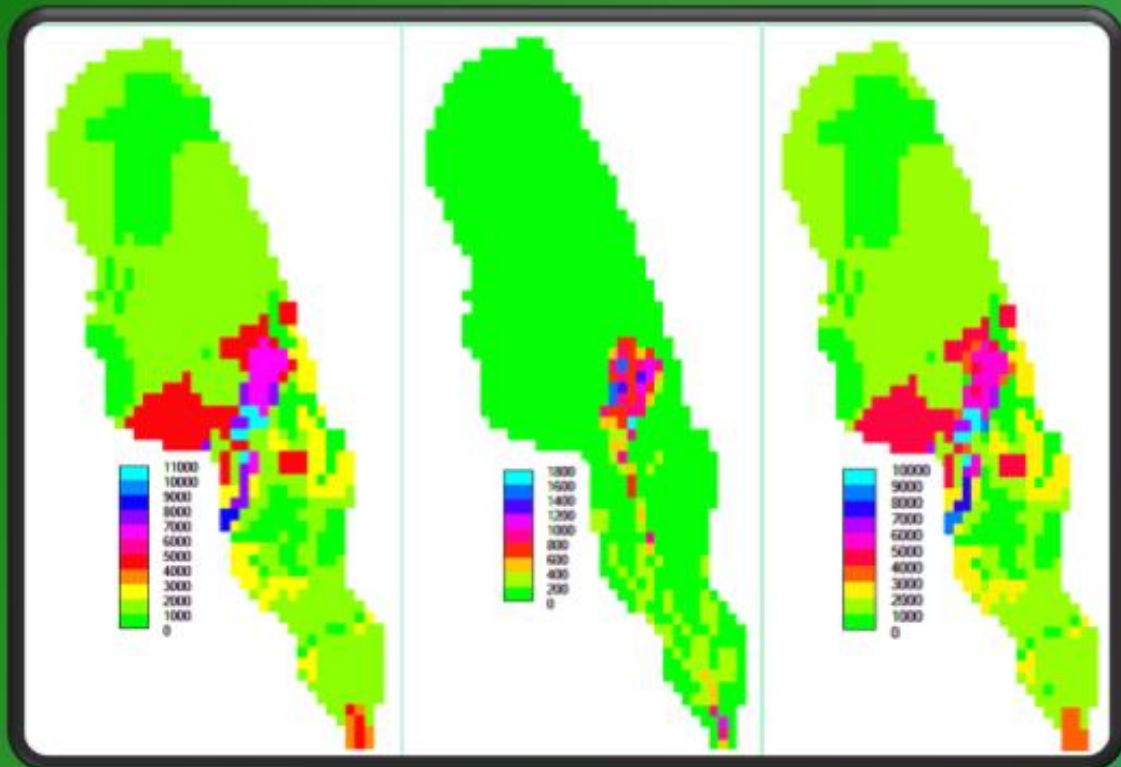


PENGEMBANGAN MODEL EROSI PARAMETER TERDISTRIBUSI



YAYAT HIDAYAT



DEPARTEMEN ILMU TANAH DAN SUMBERDAYA LAHAN
FAKULTAS PERTANIAN IPB
2023

KATA PENGANTAR

Model erosi tanah telah lama dipelajari dan digunakan dalam perencanaan usahatani dan perencanaan penggunaan lahan pada berbagai level pengambilan kebijakan. Hampir seluruh perencanaan penggunaan lahan menggunakan model erosi sebagai dasar pertimbangan pengalokasian dan penatagunaan lahan. Model tersebut terutama digunakan sebagai dasar pemilihan teknik konservasi tanah dan air yang diterapkan dalam suatu wilayah daerah aliran sungai (DAS) agar kegiatan pertanian dapat memberikan keuntungan optimal dan secara bersamaan kerusakan sumberdaya lahan dan lingkungan yang ditimbulkannya dapat diminimalkan. Model prediksi erosi juga digunakan dalam monitoring dan evaluasi program konservasi tanah dan air untuk mempertahankan kualitas air (terutama sedimen dan kandungan unsur hara) agar tidak menyebabkan pendangkalan dan pencemaran badan-badan air (sungai, waduk dan danau).

Model USLE (*Universal Soil Loss Equation*) merupakan model paling populer di Indonesia (bahkan di dunia) dan selalu digunakan dalam berbagai perencanaan pembangunan di Indonesia. Beberapa kelemahan model USLE juga banyak dikemukakan berbagai pihak terutama terkait akurasi dan aplikasinya dalam skala DAS. Pengembangan model berlanjut pada skala dinamis baik yang berbasis kejadian hujan seperti ANSWERS dan AGNPS maupun berbasis kontinyu seperti model SWAT. Pengembangan model juga berlanjut melalui integrasi dengan software GIS sehingga sebagian besar model prediksi erosi terkini mengembangkan user interface agar dapat terintegrasi dengan GIS.

Hampir seluruh model erosi dikembangkan pada wilayah *temperate* dengan kondisi biofisik lahan dan best management practice yang dapat berbeda dengan wilayah tropika basah seperti Indonesia. Oleh karena itu penggunaan model tersebut seyogyanya dilakukan secara seksama dengan mengkalibrasi berbagai parameter masukan model dan jika dimungkinkan dilakukan modifikasi. Konstruksi dan modifikasi model erosi di Indonesia hingga saat ini belum banyak dilakukan. Penelitian ini dilakukan untuk menginisiasi pengembangan model erosi di Indonesia yang barang tentu dapat memotivasi para peneliti dan stakeholder terkait lainnya.

Bogor, 20 Desember 2023

Penulis,

Yayat Hidayat

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR	i
DAFTAR ISI	ii
PENDAHULUAN	1
BAHAN DAN METODA	2
Tempat dan Waktu Penelitian	2
Metoda	2
Pengembangan Model Prediksi Erosi	2
Analisis Data	4
HASIL DAN PEMBAHASAN	5
Rekonstruksi Model	5
Pendefinisian Kerangka Model	6
Morfologi Daerah Aliran Sungai	8
Curah Hujan	9
Infiltrasi, Kadar Air Tanah, dan Pergerakan Air dalam Tanah	10
Simpanan Depresi Mikro	11
Aliran Permukaan	
Erosi Tanah, Kapasitas Transportasi Aliran dan Hasil Sedimen	15
Runing Model	21
Validasi Model	22
KESIMPULAN	25
DAFTAR PUSTAKA	26

PENDAHULUAN

Model prediksi erosi merupakan salah satu alat bantu dalam perencanaan pertanian konservasi guna mendukung pengembangan sistem pertanian berkelanjutan dan perencanaan pembangunan lainnya yang terkait dengan pengelolaan sumberdaya tanah, air dan lingkungan. Model tersebut terutama digunakan sebagai dasar pemilihan teknik konservasi tanah dan air yang diterapkan dalam suatu wilayah daerah aliran sungai (DAS) agar kegiatan pertanian dapat memberikan keuntungan optimal dan secara bersamaan kerusakan sumberdaya lahan dan lingkungan yang ditimbulkannya dapat diminimalkan. Model prediksi erosi juga digunakan dalam monitoring dan evaluasi program konservasi tanah dan air untuk mempertahankan kualitas air (terutama sedimen dan kandungan unsur hara) agar tidak menyebabkan pendangkalan dan pencemaran badan-badan air (sungai, waduk dan danau).

Model USLE (*Universal Soil Loss Equation*) merupakan model prediksi erosi empiris yang dikembangkan berdasarkan pengukuran erosi skala plot dalam jangka panjang (Wischmeier dan Smith, 1965, 1978). Model tersebut digunakan untuk memprediksi rata-rata erosi tahunan dari suatu lahan dengan penggunaan lahan dan pengelolaan tertentu. Sejak diperkenalkan pada tahun 1965, model USLE mempunyai pengaruh luar biasa dan menjadi arahan utama bagi perencanaan konservasi tanah dan air di negara dimana model tersebut dikembangkan (Amerika Serikat) dan negara-negara lainnya di dunia seperti di Indonesia. Hingga saat ini hampir seluruh kegiatan perencanaan konservasi tanah dan air di Indonesia didasarkan atas model USLE.

Meskipun telah divalidasi dan digunakan secara luas untuk memprediksi erosi dari lahan usahatani (Suwardjo, 1981; Kurnia *et al*, 1984; dan Kurnia *et al.*, 1985), ketepatan penggunaan model USLE dalam memprediksi erosi dari suatu wilayah masih diragukan (Kurnia, 1997). Hal ini disebabkan karena model USLE hanya dapat memprediksi rata-rata kehilangan tanah dari erosi lembar dan erosi alur, tidak menghitung pengendapan dan hasil sedimen dari erosi parit, tebing sungai, dasar sungai. Hasil prediksi erosi tidak menggambarkan keadaan erosi suatu wilayah yang luas, melainkan hanya dari lahan usahatani yang sempit dengan kemiringan lereng tunggal dan belum memperhitungkan pengendapan

tanah yang tererosi dari lahan di atasnya (Wischmeier, 1976).

Pendekatan model USLE yang mengasumsikan nilai parameter model bersifat homogen (*lumped parameter*) merupakan kelemahan utama model USLE sehingga model tersebut kurang valid jika digunakan untuk memprediksi erosi dari suatu wilayah DAS dengan nilai parameter model yang relatif beragam. Untuk meningkatkan keakuratan model USLE dalam memprediksi erosi DAS maka diperlukan perubahan paradigma model: a) pendekatan *lumped parameter* menjadi *distributed parameter*, dan b) pendekatan *statis* (memprediksi rata-rata erosi tahunan) menjadi *dinamis* dengan memprediksi erosi per hari hujan.

Tujuan penelitian adalah mengembangkan model prediksi erosi parameter terdistribusi berbasis raster untuk memprediksi erosi dan aliran permukaan pada skala DAS yang mampu mensimulasikan teknik konservasi tanah dan air yang biasa diterapkan di Indonesia.

BAHAN DAN METODA

Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian lapang dilaksanakan di: a) daerah tangkapan air Nopu Hulu, Desa Nopu Kecamatan Palolo Kabupaten Donggala Sulawesi Tengah, b) daerah tangkapan air mikro Kampung Arca Desa Sukaresmi Kecamatan Megamendung Kabupaten Bogor Jawa Barat, dan c) di daerah tangkapan air Sungai Bermas, Desa Koto Aro, Kecamatan Siulak Kabupaten Kerinci Jambi. Penelitian lapang dan konstruksi model berlangsung pada tahun 2004-2005 (Desa Napu) dan tahun 2012-2014 (Desa Sukaresmi), sedangkan penelitian lapang di Desa Koto Aro dilakukan pada tahun 2019, dan rekonstruksi modelnya berlangsung pada bulan September-November 2023.

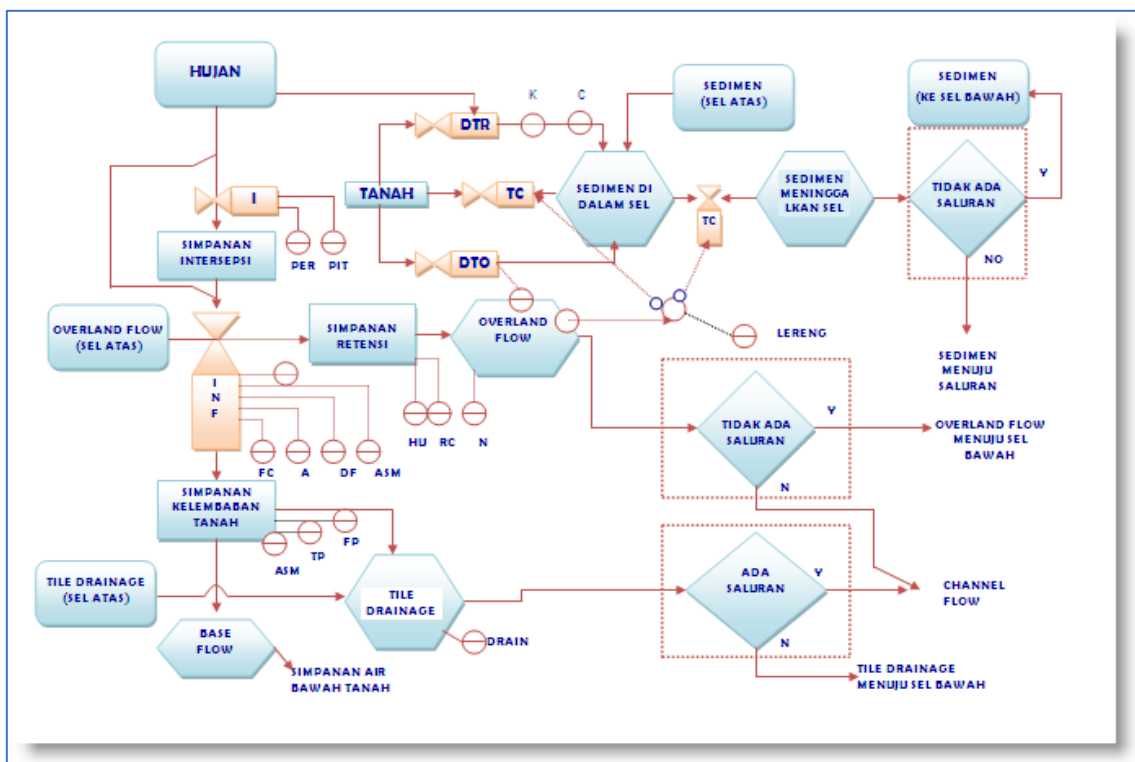
Metoda

Pengembangan Model Prediksi Erosi

Model prediksi erosi terdistribusi dikembangkan berbasis model ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*) (Beasley, 1977). Model ANSWERS merupakan model proses fisik dengan pendekatan

kejadian hujan (*event based model*) dengan kemampuan yang baik dalam memprediksi aliran permukaan dan erosi tanah pada daerah bertopografi curam. ANSWERS merupakan model deterministik yang didasarkan pada hipotesis bahwa setiap titik dalam DAS mempunyai hubungan fungsional antara laju aliran permukaan dan beberapa parameter hidrologi yang mempengaruhi aliran seperti intensitas hujan, infiltrasi, topografi, jenis tanah dan beberapa faktor lainnya. Laju aliran yang terjadi dapat digunakan untuk memodelkan fenomena pindah masa seperti erosi dan polusi dalam wilayah DAS.

Daerah aliran sungai dimodelkan dengan membangun strukturnya secara konseptual oleh kumpulan elemen bujur sangkar, sehingga derajat variabilitas spasial dalam DAS dapat terakomodasi, di mana variasi tersebut diberikan oleh nilai parameter unik setiap elemen DAS. Dengan demikian model ANSWERS ini melakukan analisis pada setiap satuan elemen (Beasley dan Huggins, 1981). Proses kerja model ANSWERS disajikan pada Gambar 1 (De Roo, 2000).



Gambar 1. Prinsip kerja model ANSWERS

Pengembangan model ditujukan agar model ANSWERS mudah dijalankan berbasis GIS dan memberikan luaran yang akurat dengan memodifikasi faktor C-USLE menjadi faktor C harian. Modifikasi faktor C-USLE juga telah dilakukan

dalam model SWAT walaupun dengan pendekatan konseptual. Untuk dapat mengembangkan model tersebut, beberapa langkah yang dilakukan:

- Mengembangkan model ANSWERS berbasis PCRaster dengan mentranslate sintak ANSWERS kedalam PCRaster.
- Mengolah data input model berbasis teks dan raster menggunakan perangkat ArcGis dan Surfer.
- Memodifikasi algoritma routing aliran permukaan pada sistem lahan dan saluran agar routing sistem lahan terkoneksi dengan sistem saluran.
- Menambahkan sub rutin teknik konservasi tanah dan air seperti rorak dan teras gulud menggunakan pendekatan proses mekanik.
- Volume aliran permukaan dan erosi yang keluar dari outlet DAS dihitung melalui proses routing kinematik.
- Keluaran model berupa aliran permukaan dan hasil sedimen disajikan dalam bentuk data tabular (tabel) dan data spasial dalam bentuk peta-peta pada berbagai time step yang diinginkan.

Analisis Data

- Aliran permukaan dan keluaran model prediksi erosi parameter terdistribusi dibandingkan dengan hasil observasi menggunakan pendekatan koefisien determinasi (R^2) dan koefisien Nash-Sutcliffe (NSE).
- Validasi dilakukan pada *outlet* daerah tangkapan air pada bangunan SPAS (stasiun pengukuran arus sungai) yang dilengkapi weir dan alat pencatat tinggi muka air otomatis (*AWLR: automatic water level recoder*) (Gambar 2).



(a)



(b)

Gambar 2. Wier pengukur debit aliran (a) dan alat pencatat tinggi muka air/AWLR (b)

HASIL DAN PEMBAHASAN

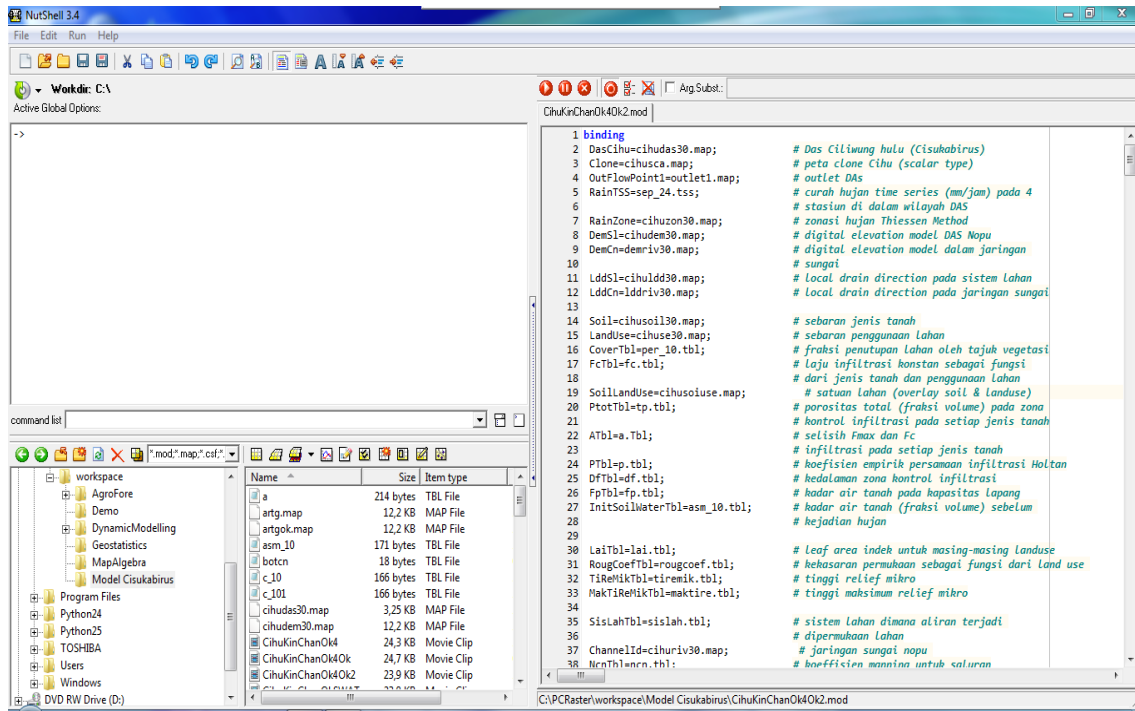
Rekontruksi Model

Model direkontruksi dari model ANSWERS menggunakan bahasa PCRaster. PCRaster merupakan sistem informasi geografi (SIG) dengan bahasa komputer tingkat tinggi yang digunakan untuk mengambil, menyimpan, memanipulasi dan menganalisis informasi geografi. Penggunaan bahasa tingkat tinggi memudahkan operasi SIG dan operasi pemodelan dilakukan secara terintegrasi dalam model PCRaster (Karssenbergh, 1998). Sistem data base terbuka dalam model PCRaster memungkinkan pengintegrasian fungsi pemodelan dan fungsi SIG seperti pemeliharaan data base, *display output* dan *hard copy*, serta memodelkan fungsi dinamik spasial dan temporal (*dynamic modelling language*). Selain itu juga kemampuan fungsi penelusuran material dalam sistem aliran (*routing*) memungkinkan model ini digunakan untuk membangun model hidrologi/erosi dengan parameter terdistribusi. Dengan demikian model yang dikembangkan adalah ANSWERS-PCRaster.

Rekonstruksi model ANSWERS-PCRaster ditujukan untuk mempermudah pengolahan data masukan model, modifikasi perhitungan (algoritma) dan penyajian keluaran model ANSWERS. Hampir seluruh algoritma model ANSWERS-Fortran dipertahankan, dengan beberapa modifikasi pada sub rutin intersepsi hujan dan simpanan depresi mikro serta menambahkan *best management practice* konservasi tanah dan air. Secara garis besar keragaan rekonstruksi model disajikan pada Gambar 3, sedangkan tahapan rekonstruksinya disajikan sebagai berikut:

Pendefinisian Kerangka Model

Rekonstruksi model didefinisikan untuk mensimulasikan hubungan antara hujan dan aliran permukaan, erosi dan deposisi, serta faktor-faktor yang mempengaruhi aliran permukaan, erosi dan deposisi. Kerangka operasional model didefinisikan dalam deklarasi *statement binding*:



Gambar 3. Keragaan rekonstruksi model ANSWERS-PCRaster

BINDING

DasCihu=nopdas30.map;	# Das Ciliwung hulu (Cisukabirus, Sukaresmi)
Clone=cihusca.map;	# peta clone Cihu (scalar type)
OutFlowPoint1=outlet1.map;	# outlet DAS
RainTSS=mei_10a.tss;	# curah hujan time series (mm/jam) pada 2
	# stasiun di dalam wilayah DAS
RainZone=nopzon30.map;	# zonasi hujan Thiessen Method
DemSl=cihudem30.map;	# digital elevation model DAS Cihu
DemCn=demriv30.map;	# digital elevation model dalam jaringan
	# sungai
LddSl=cihuldd30.map;	# local drain direction pada sistem lahan
LddCn=lddriv30.map;	# local drain direction pada jaringan sungai
Soil=cihusoil30.map;	# sebaran jenis tanah
LandUse=cihuse30.map;	# sebaran penggunaan lahan
CoverTbl=per_10.tbl;	# fraksi penutupan lahan oleh tajuk vegetasi
FcTbl=fc.tbl;	# laju infiltrasi konstan sebagai fungsi
	# dari jenis tanah dan penggunaan lahan
SoilLandUse=cihusoioise.map;	# satuan lahan (overlay soil & landuse)
PtotTbl=tp.tbl;	# porositas total (fraksi volume) pada zona
	# kontrol infiltrasi pada setiap jenis tanah
ATbl=a.tbl;	# selisih Fmax dan Fc
	# infiltrasi pada setiap jenis tanah
PTbl=p.tbl;	# koefisien empirik persamaan infiltrasi Holtan
DfTbl=df.tbl;	# kedalaman zona kontrol infiltrasi
FpTbl=fp.tbl;	# kadar air tanah pada kapasitas lapang
InitSoilWaterTbl=asm_10.tbl;	# kadar air tanah (fraksi volume) sebelum
	# kejadian hujan
LaiTbl=lai.tbl;	# leaf area indek untuk masing-masing
	# landuse
RougCoefTbl=rougcoef.tbl;	# kekasaran permukaan sebagai fungsi dari
	# land use

```

TiReMikTbl=tiremik.tbl;           # tinggi relief mikro
MakTiReMikTbl=maktire.tbl;       # tinggi maksimum relief mikro
SisLahTbl=sislah.tbl;            # sistem lahan dimana aliran terjadi
                                  # dipermukaan lahan
                                  # jaringan sungai popu
ChannellD=cihuriv30.map;         # koefisien manning untuk saluran
NcnTbl=ncn.tbl;                 # koefisien manning untuk permukaan lahan
NslTbl=nsi.tbl;                 # lebar atas saluran
TopCnTbl=topcn.tbl;             # lebar dasar saluran
BotCnTbl=botcn.tbl;             # Z untuk sistem lahan
ZSITbl=zsl.tbl;                 # Z untuk sistim saluran
ZCnTbl=zcn.tbl;                 # konstanta resesi Interflow per-jam
IRC=0.87;                       # faktor pengelolaan tanaman dan tindakan
CusleTbl=c_10.tbl;              # konservasi tanah dan air harian
                                  # faktor erodibilitas tanah USLE
KTbl=k.tbl;                     # waktu interval/timestep (detik)
T=30;                            # koefisien beta pada routing kinematik
Beta=0.6;

areamap
Clone;
timer
1 1000 1;                        # time step(tergantung lama kejadian hujan)

```

Morfologi Daerah Aliran Sungai

Daerah aliran sungai dibagi menjadi raster sel bujur sangkar dengan karakteristik unik untuk karakter topografi, tanah, vegetasi, dan jaringan sungai. Setiap sel mempunyai karakteristik unik dengan parameter input yang dapat berbeda antar sel. Jumlah aliran permukaan dan erosi (sumber sedimen) dihitung pada masing-masing sel yang kemudian ditransportasikan ke sel dibawahnya (*dowstream cell*). Volume aliran permukaan dan erosi yang keluar dari outlet DAS dihitung melalui proses routing kinematik.

MORFOLOGI DAERAH ALIRAN SUNGAI

```

SisLah=boolean(lookupscalar(SisLahTbl,SoilLandUse)); # sistem lahan diidentifikasi
                                                         # berdasarkan penggunaan lahan
Channel=ChannellD ne 0;                                # sistem saluran diidentifikasi
                                                         #berdasarkan jaringan sungai
CL=celllength();
CA=cellarea();
DCLSI=max(downstreamdist(LddSI),CL);                  # distance to downstream cell
DCLCn=max(downstreamdist(LddCn),CL);

SSI=slope(DemSI);                                     # kemiringan lereng (m/m) sistem
                                                         # lahan
SlopeDegree=atan(SSI);                                # kemiringan lereng (m/m) sistem
                                                         # saluran
SCn=slope(DemCn);

```

Curah Hujan

Intensitas hujan dengan interval waktu (*time step*) tertentu diinput dalam bentuk tabel sequensial (*time series*) sebagai file ASCII sesuai dengan penakar hujan otomatis yang dipasang di lapangan atau dengan menggunakan pola hujan (*rainfall patern*) yang biasa terjadi pada daerah tropika basah (USDA, 1975). Zonasi hujan yang diwakili oleh masing-masing penakar hujan dibuat dengan menggunakan pendekatan metoda jarak terdekat ke stasiun penakar hujan atau metoda Poligon Thiessen untuk menciptakan distribusi spasial input intensitas hujan. Curah hujan dan parameter masukan model lainnya dalam setiap sel penyusun DAS diasumsikan homogen.

Fluks air hujan dan curah hujan kumulatif dihitung pada setiap time step (interval waktu tertentu). Pada permukaan lahan bervegetasi, air hujan yang jatuh terbagi kedalam air yang jatuh pada permukaan tajuk vegetasi, dan air hujan yang langsung jatuh ke permukaan tanah. Air hujan yang jatuh di atas permukaan tajuk vegetasi dihitung dengan menggunakan persamaan Merriam (1973, *dalam* van Dijk dan Karsenberg, 2000). Sebagian air hujan yang jatuh pada permukaan tajuk vegetasi tidak pernah sampai di permukaan tanah dan disebut sebagai air intersepsi. Jumlah air yang diintersepsi dihitung per time step dengan persamaan (Merriam, 1973; *dalam* van Dijk dan Karsenberg, 2000) :

Throughfall adalah bagian air yang jatuh pada permukaan tajuk tanaman dikurangi dengan air yang diintersepsi. Curah hujan neto yang sampai dipermukaan tanah merupakan air tersedia untuk proses infiltrasi, pengisian simpanan permukaan dan pembentukan aliran permukaan (*overland flow*) serta perhitungan energi kinetik hujan.

CURAH HUJAN

```
RainCum=0; # Curah hujan kumulatif awal(mm)
RainVolTotal=0; # volume curah hujan total yang jatuh ke dalam DAS
# (m3)

Intersep=0; # simpanan intersepsi awal (mm) sebelum kejadian
# hujan untuk areal yang # tertutup tajuk vegetasi
# (coverage)
Coverage=lookupscalar(CoverTbl, SoilLandUse); # fraksi penutupan vegetasi
IntersepCumOld=0; # intersepsi kumulatif, LAI, curah hujan
# kumulatif diatas vegetasi dan thrufall
# (mm)
```

```

IntersepCum=0;
Intersepsi=0;
LAI=lookupscalar(LaiTbl,SoilLandUse);
RainVegCum=0;
ThrufallCum=0;
RainNet0=0;
RainNetoOld=0;
RainNetoNew=0;
IntersepVolTotal=0;    # volume intersepsi total yang tertahan dalam tajuk vegetasi dari
                        # seluruh DAS (m3)
RainNeto=0;           # curah hujan neto yang sampai dipermukaan tanah

```

Infiltrasi, Kadar Air Tanah, dan Pergerakan Air dalam Tanah

Infiltrasi air ke dalam tanah disimulasikan menggunakan beberapa model yang meliputi persamaan Holtan's (1961) yang dimodifikasi Huggins dan Monke (1968), persamaan Horton (1931) dan Green-Ampt (1911). Pada model Holtan, infiltrasi dihitung berdasarkan 6 parameter fisik tanah yang meliputi porositas total, kadar air kapasitas lapang, zona kontrol infiltrasi, koefisien A dan P. Infiltrasi air ke dalam tanah terjadi sesaat setelah hujan dimulai, selama hujan berlangsung dan beberapa saat setelah kejadian hujan ketika genangan air masih berada di permukaan tanah. Berdasarkan persamaan Horton, laju infiltrasi air ke dalam tanah merupakan fungsi dari infiltrasi konstan (f_c), selisih infiltrasi awal dan infiltrasi konstan ($f_0 - f_c$) dan parameter tanah yang mempengaruhi penurunan laju infiltrasi dengan meningkatnya kelembaban tanah dan waktu infiltrasi (k). Jika laju intensitas hujan efektif lebih besar dari laju infiltrasi, maka kelebihan air mengisi simpanan depresi mikro di permukaan tanah. Berdasarkan model Green-Ampt, infiltrasi air ke dalam tanah merupakan fungsi dari hantaran hidrolik tanah pada kondisi jenuh dan potensial matrik tanah pada berbagai kondisi air tanah. Hantaran hidrolik jenuh diprediksi dengan menggunakan model Rawls dan Baumer (1989), sedangkan potensial matrik menggunakan model Brakensiek *et al.* (1986).

INFILTRASI DAN KADAR AIR TANAH

```

# kapasitas infiltrasi konstan pada masing-masing jenis tanah dan landuse(mm/jam)
Fc=lookupscalar(FcTbl,SoilLandUse);
# kapasitas infiltrasi maksimum (mm/jam) pada masing-masing jenis tanah dan landuse
A=lookupscalar(ATbl,SoilLandUse);
# Fmax (mm/jam)
Fmax=Fc+A;

```

```

# porositas total(% volume) pada masing-masing jenis tanah untuk setiap landuse
Ptot=lookupscalar(PtotTbl,SoilLandUse);
# koefisien infiltrasi Holtan untuk masing-masing jenis tanah pada setiap landuse
P=lookupscalar(PTbl,SoilLandUse);
# kelembaban tanah awal sebelum kejadian hujan (% saturated) AMC pada masing-masing
# jenis tanah untuk setiap landuse
InitSoilWater=lookupscalar(InitSoilWaterTbl,SoilLandUse);
# kedalaman zona kontrol infiltrasi pada masing-masing jenis tanah untuk setiap landuse
Df=lookupscalar(DfTbl,SoilLandUse);
# potensial storage air yang akan tertahan pada zona kontrol infiltrasi (mm)
Pst=(1-InitSoilWater)*(Ptot*Df);
# kapasitas infiltrasi dan kapasitas infiltrasi kumulatif awal
Infil=if(SisLah,0);
InfilCum=if(SisLah,0);
Drn=if(SisLah,0);
DrnAkt=if(SisLah,0);
DrnAktStep=if(SisLah,0);
DrnCum=if(SisLah,0);
# Laju Infiltrasi (mm/jam) formula Holtan
Infil=if(SisLah,Fc+A*((Pst+DrnCum-InfilCum)/(Ptot*Df))**P,0);
# infiltrasi aktual dan infiltrasi kumulatif pada saat kejadian hujan
InfilAktRain=0;
InfilCumRain=0;
# perkolasi awal, perkolasi aktual dan perkolasi kumulatif ke lapisan tanah
# yang lebih dalam
# kadar air tanah kapasitas lapang
Fp=lookupscalar(FpTbl,SoilLandUse);
# kandungan air tanah (kelembaban tanah) kumulatif setelah proses infiltrasi
SoilWater=if(SisLah,0);
SoilWaterCum=if(SisLah,0);
SoilWaterDelta=if(SisLah,0);
SoilWaterDeltaCum=if(SisLah,0);
SoilWaterDeltaHeight=if(SisLah,0);
SoilWaterDeltaHeightCum=if(SisLah,0);
SoilWaterHeight=if(SisLah,0);
# total volume air yang diinfiltrasikan kedalam tanah (m3)
InfilVolTotal=0;

```

Simpanan Depresi Mikro

Simpanan depresi mikro disimulasikan dengan persamaan yang dikembangkan oleh Onstad (1984) dan Linden *et al.* (1988), dengan kekasaran permukaan digunakan sebagai ukuran relief mikro. Simpanan depresi mikro dan jumlah air yang mengisi depresi mikro disimulasikan (Onstad, 1984). Untuk terjadinya aliran permukaan diperlukan sejumlah air tertentu terakumulasi dalam depresi mikro. Jumlah air yang harus mengisi depresi mikro agar terjadi aliran permukaan disimulasikan dengan persamaan Jetten (2002).

SIMPANAN DEPRESI MIKRO DAN TINGGI MUKA AIR DIPERMUKAAN TANAH YANG TERSEDIA UNTUK TERJADINYA ALIRAN PERMUKAAN

```
# kekasaran permukaan lahan sebagai fungsi dari relief mikro
Rough=lookupscalar(RougCoefTbl,SoilLandUse);
# tinggi rata-rata relief mikro dari datum (mm)
TiReMik=lookupscalar(TiReMikTbl,SoilLandUse);
# tinggi maksimum relief mikro (mm)
MakTiReMik=lookupscalar(MakTiReMikTbl,SoilLandUse);
# simpanan depresi mikro dan simpanan depresi mikro kumulatif intial
DepMik=0;
DepMikCum=0;
# fraksi permukaan tanah yang tertutup air
FrakPerAir=0;
FrakPerAir=((TiReMik/MakTiReMik)**(1/Rough-1));
FrakPerAirBol=boolean(FrakPerAir);
# permukaan lahan yang tidak tergenang air
NoFrakPerAir=1-FrakPerAir;
NoFrakPerAirBol=boolean(NoFrakPerAir);
# tinggi permukaan air diatas permukaan tanah ketika terjadi hujan
WHRunoffRain=0;
WHRunoffCum=0;
# tinggi permukaan air diatas permukaan tanah sesaat setelah kejadian hujan
# berhenti
WHRunoffRainFresh=0;
# tinggi permukaan air diatas permukaan tanah setelah kejadian hujan berhenti
# dimana proses infiltrasi masih berlangsung dari genangan air yang terdapat
# dipermukaan tanah
WHRunoffAfRainProcess=0;
WHRunoffAfRain=0;
WHRunoffMeter=0;
# tinggi air diatas permukaan tanah yang akan tertahan menjadi simpanan
# depresi mikro
IsolatedWH=0;
# tinggi air dipermukaan tanah setelah proses infiltrasi pada saat
# hujan berlangsung
WHAfInfilRain=0;
WHAfInfilRainCum=0;
# tinggi aliran permukaan setelah kejadian hujan
WHRunoffRainFresh=0;
WHRunoffAfRainProcess=0;
WHRunoffAfRain=0;
WHRunoff=0;
WHRunoffMeter=0;
```

Aliran Permukaan

Apabila simpanan maksimum depresi mikro telah terpenuhi, semua curah hujan neto menjadi aliran permukaan. Aliran permukaan diasumsikan terjadi dalam bidang planar yang homogen, sehingga curah hujan neto yang jatuh dipermukaan tanah membentuk lapisan air dengan ketebalan sesuai dengan jumlah curah hujan yang jatuh. Aliran permukaan (*overland flow*) disimulasikan dalam kondisi aliran *steady state* pada permukaan planar yang seragam.

Debit/kecepatan aliran per unit lebar dihitung dengan formula Chow, Maidment dan Mays (1988).

Untuk aliran yang seragam, dimana $S_o = S_f$, friction factor (f) = CL/Re , $Re = 4VR/u$, radius hidrolis $R = y$, dan aliran terjadi secara laminar, kedalaman dan kecepatan aliran permukaan dapat ditentukan dengan menggunakan formula (Chow *et al.*, 1988). Jika aliran menjadi turbulen, *friction factor* menjadi tidak tergantung pada bilangan Reynold, tetapi tergantung pada kekasaran permukaan sehingga kedalaman aliran permukaan ditentukan dengan persamaan (Chow *et al.*, 1988):

Karena hujan jatuh pada wilayah berlereng yang mempunyai luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan permukaan horizontal, maka lapisan air yang dihasilkan menjadi lebih rendah, sehingga tinggi air di permukaan lahan pada setiap time step bervariasi dengan waktu.

Routing aliran permukaan dilakukan dengan pendekatan gelombang kinematik pada persamaan Manning's diatas *local drain direction (ldd)*. Ldd.map dibuat berdasarkan peta DEM (digital elevation model) yang diimport dari program ArcGis. Pendekatan gelombang kinematik mengasumsikan tidak berpengaruhnya percepatan gravitasi dan tekanan lainnya dalam persamaan momentum, dimana pergerakan gelombang digambarkan dengan persamaan kontinuitas. Dengan kata lain pendekatan gelombang kinematik hanya digunakan pada kemiringan drainase yang relatif curam, dimana kemiringan permukaan air diasumsikan sama dengan kemiringan dasar permukaan air (Chow *et al.*, 1988).

ALIRAN PERMUKAAN (SISTEM LAHAN DAN SALURAN)

ROUTING

tipe routing dibedakan menjadi routing pada sistem lahan dan routing pada

sistem saluran

RoutType=if(SisLah,1,if(Channel,2));

koefisien manning(N) untuk sistem lahan dan saluran

NSI=lookupscalar(NSITbl,SisLah);

NCn=lookupscalar(NcnTbl,Channel);

lebar saluran bagian atas (top width)

TopCnWidth=if(Channel,lookupscalar(TopCnTbl,Channel),0);

lebar sistem lahan (top width) diasumsikan sebagai saluran

TopSIWidth=CL;

lebar dasar saluran (bottom width)

BotCnWidth= if(Channel,lookupscalar(BotCnTbl,Channel),0);

lebar dasar sistem lahan yang diasumsikan sebagai saluran

BotSIWidth=CL;


```

# area saluran dalam setiap sel (m2)
ArCn=cover(TopCnWidth*CL,0);
# area antar saluran (m2)
ArInterCn=CA-ArCn;
# ratio area saluran terhadap area antar saluran pada sel yang mempunyai saluran
ArCnDivArInterCn=ArCn/ArInterCn;
# lebar dasar sistem lahan yang diasumsikan sebagai saluran
BotSIWidth=CL;
# Nilai Z
ZCn=lookupscalar(ZCnTbl,Channel);
ZSI=lookupscalar(ZSITbl,SoilLandUse);
# term for alpha sistem lahan
AlphaTermSI=(NSI/(sqrt(SSI)))**Beta;
# term alpha untuk saluran
AlphaTermCn=(NCn/(sqrt(SCn)))**Beta;
# Alpha power
AlphaPow=(2/3)*Beta;
# sqrt(1+sqr(Z)) untuk sistem lahan
SqrtOnePlusSqrZSI=sqrt(1+sqr(ZSI));
# sqrt(1+sqr(Z)) untuk sistem saluran
SqrtOnePlusSqrZCn=sqrt(1+sqr(ZCn));
# debit aliran permukaan initial (m3/dt)
QSI=if(SisLah,0);
QCn=if(Channel,0);
# dasar saluran merupakan lapisan kedap dan selalu tergenang air (air mengalir terus pada
musim penghujan) oleh karena itu infiltrasi air dari dasar saluran diasumsikan rendah (saturated
hydraulic conductivity)
# infiltrasi dari dasar saluran (m/time step)
InfilCan=if(Channel,0);
InfilCanCum=if(Channel,0);
SRGX=if(SisLah,0);
VolSRGX=if(SisLah,0);
VolSGW=if(SisLah,0);
# surface storage diasumsikan nol: aliran selalu mengalir pada musim penghujan dan
kemiringan saluran curam tinggi permukaan air pada saluran yang berasal dari overland flow
dari sistem lahan
WHRunoffMeterCan=0;
# curah hujan langsung kedalam saluran
RainCan=0;
# tinggi permukaan air dalam saluran sebelum infiltrasi
WHRunoffMeterCanBelInfil=0;
# infiltrasi aktual dari dasar saluran
InfilCanAkt=0;
# tinggi permukaan air dalam saluran setelah infiltrasi pada saat kejadian
# hujan dan setelah kejadian hujan
WHRunoffMeterCanRain=0;
WHRunoffMeterCanAfRainFresh=0;
WHRunoffMeterCanAfRainProcess=0;
WHRunoffMeterCanAfRain=0;
WHRunoffMeterCanFin=0;

```

QInFlow=if(SisLah,0);
VolSGWCum=0;

Erosi Tanah, Kapasitas Transportasi Aliran dan Hasil Sedimen

Penghancuran partikel tanah merupakan fungsi dari pukulan butir air hujan dan aliran air di permukaan lahan. Penghancuran partikel tanah oleh pukulan air hujan diprediksi sebagai fungsi dari energi kinetik hujan seperti digambarkan oleh Meyer dan Wischmeier (1969, *dalam* Byne, 2000). Faktor tanaman dan pengelolaannya yang digunakan adalah faktor C-terdistribusi ditentukan berdasarkan hasil perbandingan besaran erosi plot per-hari hujan dengan pengelolaan tanaman tertentu terhadap erosi dari plot yang dibiarkan pada kondisi yang identik. Penghancuran sedimen akibat aliran air ditentukan berdasarkan model yang dikembangkan Foster (1976) yang dilandasi oleh model persamaan Meyer dan Wischmeier (1969).

Kemampuan aliran air untuk mengerosikan tanah diasumsikan tidak tergantung pada jumlah material yang dibawa aliran dan hanya merupakan fungsi dari energi aliran air. Deposisi terjadi dengan laju sama dengan $wCVs$, dimana w = lebar bidang aliran (m), C = konsentrasi sedimen dalam aliran (kg m^{-3}), dan Vs = *settling velocity* partikel (ms^{-1}). Konsentrasi pada *transport capacity* menunjukkan bahwa konsentrasi sedimen pada kondisi laju erosi oleh aliran dan laju deposisi dalam keadaan setimbang. Pada kondisi tersebut erosi bersih adalah nol, karena erosi oleh aliran sama dengan laju deposisi. Kapasitas transportasi aliran permukaan (*overland flow*) dimodelkan sebagai fungsi dari *unit stream power* (Govers, 1990).

Deposisi dihitung dengan cara yang sama dengan menambahkan *exponential decay function* untuk mensimulasikan pengaruh pengendapan partikel (*settling particle*) yang menurun ketika mencapai dasar lapisan air. Deposisi terjadi ketika C lebih besar dari TC . Dengan mendefinisikan $Y=1$ (tidak ada pengaruh kekuatan tanah/*soil strength*) terhadap deposisi, deposisi dihitung dengan persamaan (Jetten, 2002).

Routing sedimen dalam suspensi aliran menggunakan pendekatan gelombang kinematik pada persamaan Maning (Chow *et al.*, 1988) seperti halnya untuk aliran permukaan.

EROSI TANAH, KAPASITAS TRANSPORTASI ALIRAN DAN HASIL SEDIMEN

EROSI

```
# erosi percik akibat pukulan air hujan
RainDetach=0;
# erosi karena gerusan aliran permukaan
RunoffDetach=0;
# kapasitas transportasi aliran
KapTrans=sclar(0);
# konsentrasi sedimen
SedKons=0;
# sedimen input dari upstream sel dan output dari downstream sel
SedIn=0;
# Sedimen yang dideposisikan dalam areal DAS awal (kg)
DepSedKi=0;
# total erosi DAS awal (kg)
ErosiKi=if(SisLah,0);
ErosiSL=if(SisLah,0);
QSedDAS=if(Channel,0);
```

PROSES DINAMIK TEMPORAL DAN SPASIAL

```
# intensitas hujan (mm/jam) yang jatuh dipermukaan lahan dengan pendekatan
# poligon Thiessen pada setiap time step
RainIn=timeinputscalar(RainTSS,RainZone);
# curah hujan pertime step (mm)
Rain=RainIn*T/3600;
# Curah hujan kumulatif (mm)
RainCum=RainCum+Rain;
# volume air hujan per time step (m3)
RainVol=(Rain/1000)*CA;
# Volume curah hujan total (m3)
RainVolTot=maptotal(RainVol);
# intensitas hujan yang jatuh diatas vegetasi (mm/jam)
RainVegIn=RainIn;
# curah hujan yang jatuh diatas vegetasi (mm)
RainVeg=Coverage*RainVegIn*T/3600;
# curah hujan kumulatif yang jatuh diatas vegetasi (mm)
RainVegCum=RainVegCum+RainVeg;
# kapasitas intersepsi maksimal per time steps pada masing-masing land use (mm)
# Von Hoyningen-Huene (1981):
IntersepMax=0.935+(0.498*LAI)-0.00575*sqr(LAI);
# intersepsi kumulatif pertime step pada masing-masing land use (mm) Aston (1979)
IntersepCumOld=Coverage*IntersepMax*(1-exp(-(0.046*LAI)*(RainCum-Rain)/IntersepMax));
IntersepCum=Coverage*IntersepMax*(1-exp(-(0.046*LAI)*(RainCum)/IntersepMax));
# intersepsi air hujan per time step (mm)
Intersepsi=IntersepCum-IntersepCumOld;
# volume air yang diintersepsi tajuk vegetasi (m3)
IntersepVol=(Intersepsi/1000)*Coverage*CA;
IntersepVolTot = maptotal(IntersepVol);
# thrufall pertime step (mm)
Thrufall=RainVeg-Intersepsi;
```

```

# Volume thrufall (m3)
VolThrufall=Thrufall/1000*Coverage*CA;
# total volume thrufall (m3)
VolThrufallTot=maptotal(VolThrufall);
# curah hujan langsung yang jatuh diatas permukaan tanah (mm)
DirectRain=Rain-Coverage*Rain;
# Curah hujan neto pertime step (mm air diatas permukaan lahan), yang tersedia
# untuk infiltrasi, simpanan depresi mikro dan aliran permukaan
RainNetoOld=max(Rain-Intersepsi+Thrufall,0);
RainNeto=RainNetoOld*cos(SlopeDegree);
# volume curah hujan neto (m3)
VolRainNeto=RainNeto*CA;
# jumlah air yang tersedia untuk infiltrasi, simpanan depresi mikro dan aliran
# permukaan (mm/jam)
RainNetoJam=(RainNeto/T)*3600;
# laju infiltrasi aktual (mm/jam) ketika terjadi hujan dari lahan tergenang dan
# tidak tergenang air
LajuInfilNoFrakPerAir=if(NoFrakPerAirBol,RainNetoJam);
LajuInfilGTRain=if(FrakPerAirBol,Infil,LajuInfilNoFrakPerAir);
LajuInfilAktRain=if(RainNetoJam lt Infil,RainNetoJam,LajuInfilGTRain);
# jumlah air yang diinfiltrasikan (mm) per time step selama kejadian hujan dari
# areal yang tergenang air dan tidak tergenang air
InfilAktRain=LajuInfilAktRain*T/3600;
# tinggi air dipermukaan tanah (mm) setelah infiltrasi pada saat kejadian hujan
WHAfInfilRain=max(RainNeto-InfilAktRain,0);
WHAfInfilRainCum=WHAfInfilRainCum+WHAfInfilRain;
# simpanan depresi mikro potensial per time step (mm) Huggins & Monke (1966)
DepMik=MakTiReMik*Rough*((TiReMik/MakTiReMik)**(1/Rough));
# simpanan depresi mikro aktual (mm)
DepMikAkt=if(WHAfInfilRainCum gt DepMik,DepMik,WHAfInfilRainCum);
# laju infiltrasi air setelah kejadian hujan, dimana air yang akan diinfiltrasi
# kan adalah air yang terdapat dalam simpanan depresi mikro (mm) atau air genangan
# dalam depresi mikro, dengan simpanan depresi mikro tersebut terdapat pada
# lokasi penutupan air
DepMikAfRain=DepMikAkt;
# laju infiltrasi pada simpanan depresi mikro
LajuInfilDepMik=if(FrakPerAirBol,Infil,0);
# jumlah air yang diinfiltrasikan (mm) dari simpanan depresi mikro per timestep
InfilDepMik=LajuInfilDepMik*T/3600*FrakPerAir;
# perubahan tinggi air dalam simpanan depresi mikro selama proses infiltrasi
DepMikProcess=DepMikAfRain-InfilDepMik;
DepMikLast=DepMikProcess-InfilDepMik;
# laju infiltrasi dari simpanan depresi mikro akan terus berlangsung hingga
# simpanan depresi mikro tersebut habis(deprik=0)
LajuInfilDepMikAkt=if(DepMikLast ne 0, LajuInfilDepMik,0);
# jumlah air yang diinfiltrasikan setelah kejadian hujan (mm) pertime step
InfilAktAfRain=if(RainNetoJam eq 0,LajuInfilDepMikAkt*T/3600*FrakPerAir);
# jumlah air yang diinfiltrasikan
InfilOk=if(RainNetoJam ne 0,InfilAktRain,InfilAktAfRain);
# infiltrasi kumulatif (mm)

```

```

InfilCum=InfilCum+InfilOk;
# volume air yang diinfiltrasikan (m3) selama dan setelah kejadian hujan
InfilOkVol=InfilOk/1000*CA;
# perubahan kandungan air tanah (kelembaban tanah) setelah infiltrasi (fraksi jenuh)
SoilWaterDelta=max((InfilOk-DrnAktStep)/(Ptot*Df),0);
# perubahan tinggi kandungan air tanah setelah infiltrasi (mm)
SoilWaterDeltaHeight=max(InfilOk-DrnAktStep,0);
# perubahan kelembaban tanah kumulatif (fraksi jenuh)
SoilWaterDeltaCum=SoilWaterDeltaCum+SoilWaterDelta;
# perubahan tinggi kandungan air tanah kumulatif (mm)
SoilWaterDeltaHeightCum=SoilWaterDeltaHeightCum+SoilWaterDeltaHeight;
# kandungan air tanah (kelembaban tanah) dari waktu ke waktu setelah proses
# infiltrasi (fraksi jenuh)
SoilWater=InitSoilWater+SoilWaterDeltaCum;
# tinggi kandungan air tanah dari waktu ke waktu setelah proses infiltrasi (mm)
SoilWaterHeight=(InitSoilWater*Ptot*Df)+SoilWaterDeltaHeightCum;
# perkolasi air ke lapisan lebih dalam (mm/jam)
DrnTerm=(Pst+DrnCum-InfilCum)/((1-Fp)*(Ptot*Df));
Drn=Fc*(1-DrnTerm)**3;
# jumlah air yang diperlukan untuk mencapai kapasitas lapang (fraksi jenuh)
ToFp=(Fp-InitSoilWater)/(Ptot*Df);
# drainase air ke lapisan lebih dalam (mm/jam) terjadi setelah tercapai kelem
# baban tanah kapasitas lapang
DrnAkt=max(if(SoilWaterDeltaCum gt ToFp,Drn,0),0);
# Jumlah air yang diperkolasikan per time step (mm)
DrnAktStep=DrnAkt*T/3600;
# Drainase kumulatif (mm)
DrnCum= DrnCum+DrnAktStep;
# volume air yang diperkolasikan (m3)
VolDrn=DrnAktStep/1000*CA;
# total volume air yang diperkolasikan
VolDrnTot=maptotal(VolDrn);
# storage interflow (m) tinggi kelembaban tanah (kandungan air tanah yang meningkat
# akibat proses infiltrasi dan berkurang akibat proses perkolasi/drainase
SRGX=SoilWaterDeltaHeight/1000*cos(SlopeDegree);
# volume storage interflow (m3)
VolSRGX=SRGX*CA;
# interflow diasumsikan terjadi setelah potensial soil moisture storage (Pst)
# terpenuhi dan profil tanah diatas lapisan semi permeabel diasumsikan jenuh
# debit interflow (m3/dt); formula empiris Crawford and Linsley (1966)
qInterFlow=if(SoilWaterDeltaHeightCum gt Pst, (1-(IRC**0.104167))*VolSRGX,0);
# simpanan depresi mikro kumulatif (mm)
DepMikCum=DepMikCum+DepMikAkt;
# jumlah simpanan depresi mikro yang harus terpenuhi oleh air hujan (neto)
# sebelum terjadi aliran permukaan (mm)
MaxIsolatedWater=MakTiReMik*Rough*((0.1)**(1/Rough-1));
# volume simpanan depresi mikro (m3)
DepMikVol=(DepMikAkt/1000)*CA;
# tinggi aliran permukaan (surface runoff) pada sistem lahan terjadi setelah
# MaxIsolatedWater terpenuhi pada saat kejadian hujan

```

```

WHRunoff=max(if(WHAfInfilRainCum gt MaxIsolatedWater,WHAfInfilRain,0),0);
WHRunoffCum=WHRunoffCum+WHRunoff;
WHRunoffMeter=WHRunoff/1000;
## ROUTING KINEMATIC UNTUK MENGHITUNG DEBIT ALIRAN PERMUKAAN PADA
SISTEM LAHAN
FlowWidth=CL;
AlphaSI=AlphaTermSI*(FlowWidth+2*WHRunoffMeter*SqrtOnePlusSqrZSI)**AlphaPow;
# Volume aliran permukaan sebagai input dari curah hujan-intersepsi-simpanan
# depresimikro (m3)
QInSI=WHRunoffMeter*CA;
# debit aliran permukaan (m3/s/m): lateral inflow
qoinSI=QInSI/T/DCLSI;
# debit aliran permukaan (m3/dt) yang akan keluar dari outlet DAS dengan
# menggunakan routing kinematic
QSI=kinematic(LddSI,QSI,qoinSI,AlphaSI,Beta,1,T,DCLSI);
# debit (lt/dt)
QSIlt=QSI*1000;
# debit aliran permukaan (lt/dt) time series pada outlet
DischargeSITSS =timeoutput(OutFlowPoint1,QSIlt);
#volume aliran permukaan pertime step (m3) pada masing-masing sel
VolRunoffSI=QSI*T;
# Volume aliran time series (lt)
VolRunoffTotSITSS=timeoutput(OutFlowPoint1,VolRunoffSI*1000);
## ROUTING KINEMATIC UNTUK MENGHITUNG DEBIT INTERFLOW
# debit interflow per unit lebar(m3/dt/m)
qoInterFlow=qInterFlow/CA;
# debit interflow (m3/dt) didalam tanah yang akan masuk kedalam sistem saluran
QInFlow=kinematic(LddSI,QInFlow,qoInterFlow,AlphaSI,Beta,1,T,DCLSI);
report InTSS=timeoutput(OutFlowPoint1,QInFlow);
## SISTEM SALURAN
# Volume aliran permukaan dari sistem lahan yang akan masuk kedalam saluran(m3)
VolSIRout=QSI*T;
# tinggi aliran permukaan dari sistem lahan yang akan masuk kedalam saluran (m)
WHRunoffSIRout=VolSIRout/ArInterCn;
# tinggi permukaan air dalam saluran sebagai akibat masuknya air dari sistem lahan
WHRunoffSICan=if(Channel,WHRunoffSIRout/ArCnDivArInterCn,0);
# curah hujan yang jatuh diatas saluran(m)
RainCan=if(Channel,Rain/1000,0);
# infiltrasi dari dasar saluran (m) diasumsikan konstan
InfilCan=if(Channel,0.0000000001,0);
# tinggi aliran permukaan dalam saluran
WHRunoffCanBelInfil=cover(WHRunoffSICan+RainCan,0);
InfilCanAkt=if(WHRunoffCanBelInfil gt InfilCan,InfilCan,WHRunoffCanBelInfil);
# tinggi aliran permukaan dalam saluran setelah infiltrasi dan curah hujan langsung
# kedalam saluran pada saat terjadi hujan
WHRunoffCanRain=cover(WHRunoffCanBelInfil-InfilCanAkt,0);
# tinggi aliran permukaan dalam saluran setelah infiltrasi, curah hujan langsung,
# kedalam saluran pada saat kejadian hujan dan setelah kejadian hujan
WHRunoffCanAfRainFresh=WHRunoffCanRain;
WHRunoffCanAfRainProcess=WHRunoffCanAfRainFresh-InfilCanAkt;

```

```

WHRunoffCanAfRain=if(RainNeto eq 0,WHRunoffCanAfRainProcess-InfilCanAkt,0);
WHRunoffCan=if(RainNeto ne 0,WHRunoffCanRain,WHRunoffCanAfRain);
# tebal aliran interflow (m) yang mengalir di dalam tanah
WHInterFlow=QInFlow*T/CA;
# tebal aliran interflow (m) di dalam saluran
WHInterFlowCan=if(Channel,WHInterFlow/ArCnDivArInterCn,0);
# tinggi air dalam saluran (m) final
WHRunoffCanFin=WHRunoffCan+WHInterFlowCan;
## ROUTING ALIRAN PERMUKAAN PADA SISTEM SALURAN
# lebar saluran untuk overland flow pada sistem saluran
FlowWidthCn=TopCnWidth;
AlphaCn=AlphaTermCn*(FlowWidthCn+2*WHRunoffCanFin*SqrtOnePlusSqrZCn)**AlphaPow;
# Volume aliran permukaan dalam sistem saluran sebagai input dari sistem lahan
QInCn=(FlowWidthCn*2*WHRunoffCanFin*SqrtOnePlusSqrZCn);
# debit aliran permukaan (m3/s/m): lateral inflow
qoinCn=QInCn/T/DCLCn;
# debit aliran permukaan (m3/dt) yang akan keluar dari outlet DAS dengan
# menggunakan routing kinematic
QCn=if(Channel,kinematic(LddCn,QCn,qoinCn,AlphaCn,Beta,1,T,DCLCn));
# debit (lt/dt)
QCnlt=QCn*1000;
# debit aliran permukaan (lt/dt) time series pada outlet
report DischargeCn1_Mei10TSS =timeoutput(OutFlowPoint1,QCnlt);
report DischargeCn2_Mei10TSS =timeoutput(OutFlowPoint2,QCnlt);
report DischargeCn3a_Mei10TSS =timeoutput(OutFlowPoint3,QCnlt);
## SPLASH EROSION DAN OVERLAND FLOW DETACHMENT (SUMBER SEDIMEN)
# faktor C dan K dari model USLE (Wischemier and Smith, 1978)
Cusle=lookupscalar(CusleTbl,SoilLandUse);
K=lookupscalar(KTbl,SoilLandUse);
# intensitas hujan (mm/menit)
RainInStep=RainIn/60;
# splash erosion (erosi percik kg/menit) : Meyer and Wischmeier (1969)
RainDetach=if(RainNeto ne 0, 0.108*Cusle*K*CA*(RainInStep**2),0);
# splash erosion kg/dt
RainDetachDet=RainDetach/60;
# debit aliran permukaan perunit lebar per menit (m3/dt/m) pada sistem lahan
qoSI=QSI/CL;
# overland flow detachment (kg/menit) Meyer and Wischmeier (1969) modified
# by Foster(1976)
RunoffDetach=if(qoSI ne 0, 0.90*Cusle*K*CA*SSI*qoSI,0);
# runoff erosion (kg/dt)
RunoffDetachDet=RunoffDetach/60;
# jumlah sedimen yang siap diangkut aliran permukaan (gross erosion) kg/dt
GrosErosion=RainDetachDet+RunoffDetachDet;
## KAPASITAS TRANSPORTASI ALIRAN DAN HASIL SEDIMEN (NET EROSION)
# kapasitas transportasi aliran pada saat aliran laminar (kg/menit-m) pada
# sistem lahan
TcLam=161*SSI*(qoSI**0.5);
# TcLam (kg/dt)
TcLamDet=TcLam/60;

```

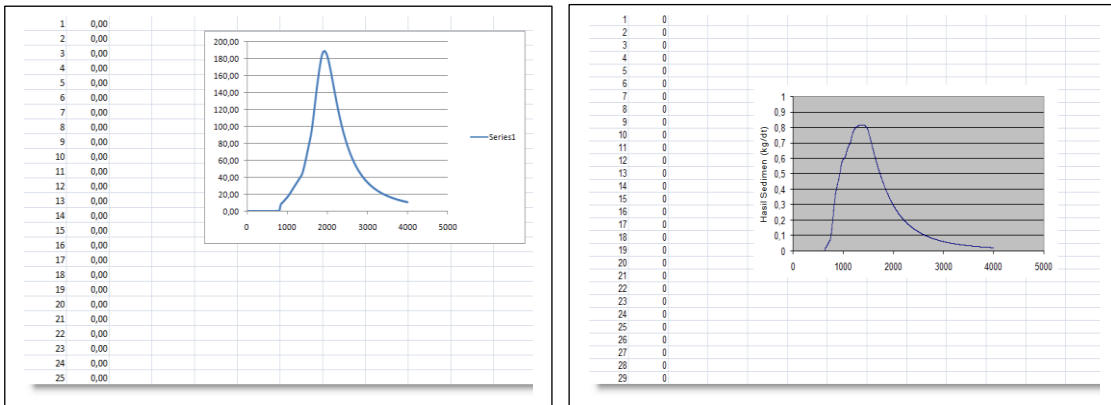
```

# kapasitas transportasi aliran pada saat aliran turbulen (kg/menit-m)
TcTur=16.32*SSI*(qoSI**2);
# TcTur (kg/dt)
TcTurDet=TcTur/60;
# kapasitas transportasi aliran (kg/dt)
# kapasitas transportasi aliran (kg/dt)
KapTrans=if(qoSI le 0.046,TcLamDet,TcTurDet);
# sedimen yang terbawa aliran permukaan (erosi) pada masing-masing sel (kg/dt)
EroSel=if(GrosErosion lt KapTrans,GrosErosion,0);
# sedimen yang dideposisikan pada masing-masing sel (kg/time step)
DepSel=if(GrosErosion gt KapTrans,GrosErosion-KapTrans,0);
# debit sedimen yang terangkut (erosi) pada setiap sel (kg/detik) sesuai dengan
# kapasitas transportasi alirannya
qoSedSI=EroSel;
# debit sedimen lateral (kg/dt/m)
qoSedSIIn=qoSedSI/DCLSI;
# erosi neto yang keluar dari sistem lahan (kg/dt)
ErosiSL=kinematic(LddSI,ErosiSL,qoSedSIIn,AlphaSI,Beta,1,T,DCLSI);
# debit sedimen dari sistem lahan yang akan masuk kedalam saluran (kg/dt)
QsedCn=ErosiSL;
# debit sedimen lateral dalam sistem saluran (kg/dt/m)
QsedCnIn=QsedCn/(DCLCn/BotCnWidth);
# Erosi neto yang akan keluar dari outlet DAS (kg/det)
QsedDAS=if(Channel,kinematic(LddCn,QsedDAS,QsedCnIn,AlphaCn,Beta,1,T,DCLCn));
report ErosiKinC1_Mituh=timeoutput(OutFlowPoint1,QsedDAS);
report ErosiKinC2_Apr1TG4=timeoutput(OutFlowPoint2,QsedDAS);
report ErosiKinC3_Apr1TG4=timeoutput(OutFlowPoint3,QsedDAS);
# recheck erosi total, erosi bersih dan deposisi sedimen
report EroSelTot=maptotal(EroSel);
report DepSelTot=maptotal(DepSel);
report GrosTot=maptotal(GrosErosion);

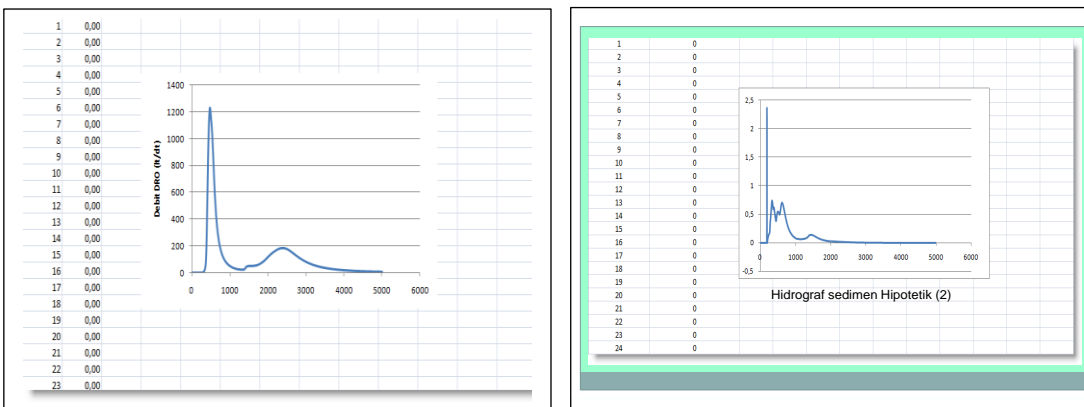
```

Runing Model

Model dijalankan dengan menggunakan masukan data sekunder di Daerah Tangkapan Air Kampung Arca, Desa Sukaresmi, Kecamatan Mega Mendung, Kabupaten Bogor, Jawa Barat model sudah dijalankan dengan menggunakan data dummy untuk karakteristik lahan dan curah hujan. Keluaran model disajikan dalam file teks (ASCII) yang kemudian dibuka dengan menggunakan Microsoft Excel untuk diplot sebagai grafik (hidrograf). Hidrograf aliran permukaan dan hasil sedimen hipotetik untuk kejadian hujan sedang (25 mm) dan kejadian hujan lebat (80 mm) disajikan pada Gambar 4, dan 5. Sedangkan output peta disajikan dalam bentuk peta PCRaster yang dapat diprint dengan sistem *capture image*.



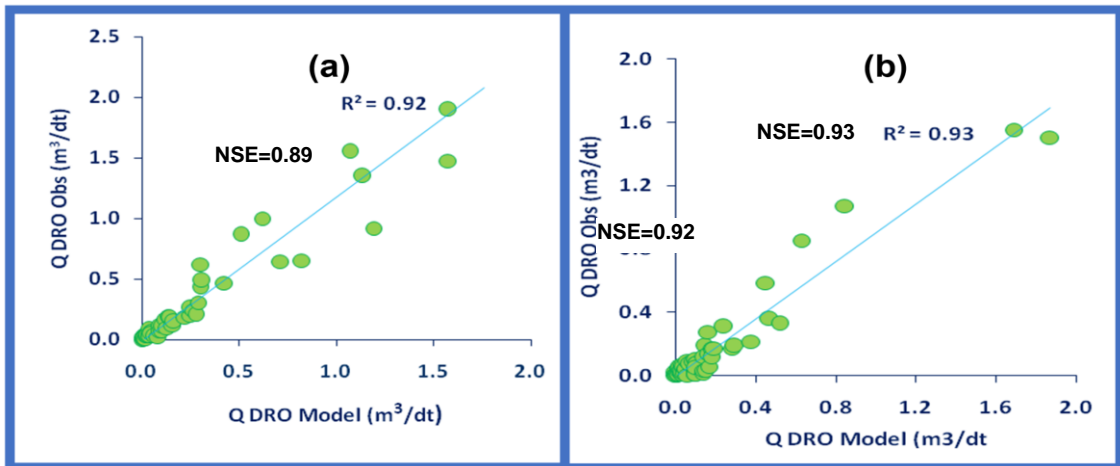
Gambar 4. Hidrograf DRO (*direct runoff*) dan sedimen hipotetik keluaran model pada curah hujan sedang (25 mm)



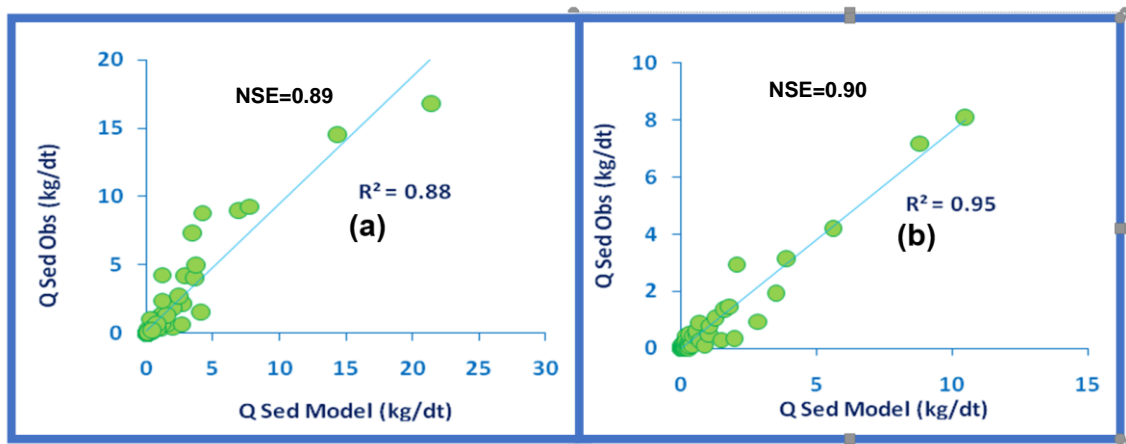
Gambar 5. Hidrograf DRO (*direct runoff*) dan sedimen hipotetik keluaran model pada curah hujan tinggi (80 mm)

Validasi Model

Validasi model dilakukan dalam beberapa tahapan yang dilakukan di Daerah Tangkapan Air Nopu Hulu, Desa Nopu Kecamatan Palolo, Kabupaten Donggala, Sulawesi Tengah dengan luas areal 234.5 hektar. Pada validasi awal mengindikasikan model belum mampu mensimulasikan fenomena dan proses erosi dan transportasi sedimen pada sistem alam, sebagai akibat dari penyusunan algoritma yang belum benar dan penulisan sintak yang belum tepat. Melalui perbaikan sintak dan penyusunan algoritma pada berbagai sub rutin model, model beribu kali diperbaiki dan dijalankan untuk mendapatkan *output* yang cukup relevan dengan kondisi lapang. Hasil validasi disajikan pada Gambar 6 dan 7.

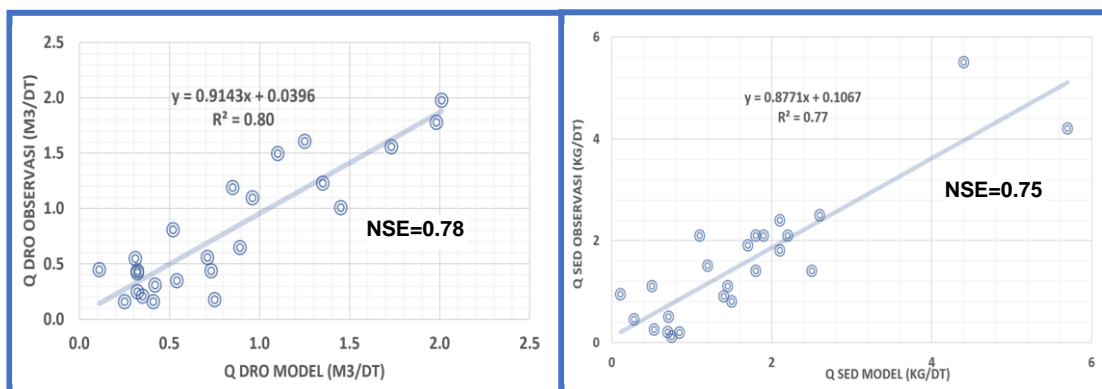


Gambar 6. Korelasi debit puncak DRO keluaran model (QDRO Model) dan debit DRO hasil pengukuran (QDRO Obs) pada *outlet* 1 (a), dan *outlet* 2 (b) DAS Nopu Hulu Sulawesi Tengah



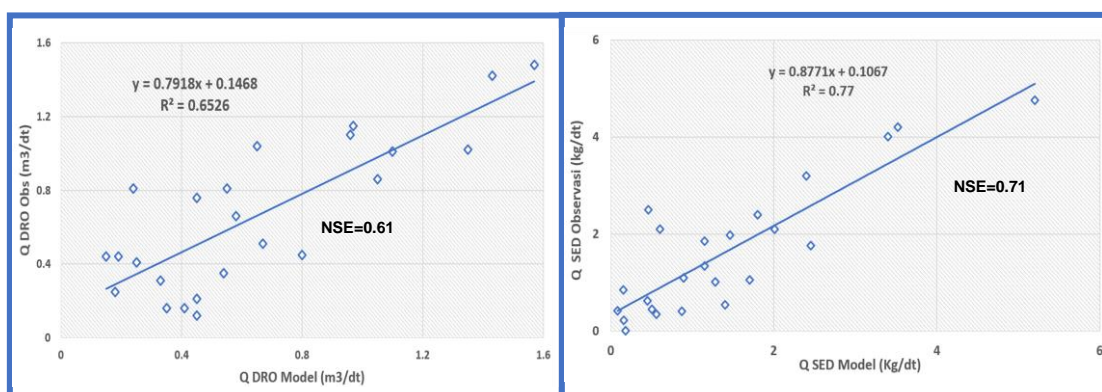
Gambar 7. Korelasi debit puncak sedimen keluaran model (QSed Model) dengan debit puncak sedimen pengukuran (QSed Obs) pada *outlet* 1 (a) dan *outlet* 2 (b) DAS Nopu Hulu Sulawesi Tengah

Validasi kedua dilakukan di DAS Citarum Hulu pada Daerah Tangkapan Air Kampung Arca Desa Sukaresmi, Kecamatan Mega Mendung Kabupaten Bogor Jawa Barat. Hasil validasi tersebut mengindikasikan model mempunyai performa yang baik seperti ditunjukkan oleh nilai koefisien NSE 0.75-0.78.



Gambar 8. Korelasi debit puncak DRO keluaran model (Q DRO Model) dengan debit puncak DRO pengukuran (Q DRO Obs) (a) dan debit puncak sedimen keluaran model (Qsed Model) dengan debit puncak sedimen hasil pengukuran (Q Sed Obs) di DTA Kampung Arca Bogor Jawa Barat

Validasi selanjutnya dilakukan pada daerah tangkapan air Sungai Bermas, Desa Koto Aro Kecamatan Siulak, Kabupaten Kerinci Jambi dengan luasan DTA 115.6 hektar. Penggunaan lahan dominan pada areal tersebut adalah kebun campuran dan agroforestri berbasis kopi. Hasil validasi juga menunjukkan performa model yang baik seperti disajikan pada Gambar 9.



Gambar 9. Korelasi debit puncak DRO keluaran model (Q DRO Model) dengan debit puncak DRO pengukuran (Q DRO Obs) (a) dan debit puncak sedimen keluaran model (Qsed Model) dengan debit puncak sedimen hasil pengukuran (Q Sed Obs) di DTA Sungai Bermas Siulak Jambi

KESIMPULAN

1. Model erosi parameter terdistribusi telah direkonstruksi berbasis model ANSWERS dan dijalankan menggunakan model PCRaster dan Nutshell 3.4, dengan beberapa modifikasi algoritma dalam subroutin intersepi hujan, infiltrasi dan erosi tanah.
2. Model dikembangkan berbasis kejadian hujan dapat menyajikan luaran dalam bentuk tabel txt dan peta yang dicapture dalam bentuk image. Perhitungan model menjadi cukup efisien dimana keluaran debit aliran sungai dan erosi tanah (hasil sedimen) dapat dihitung pada outlet dan setiap cabang sungai yang didefinsikan dalam model.
3. Rekonstruksi dan validasi model memerlukan waktu dan upaya yang banyak sehingga model tersebut dapat mensimulasikan proses atau fenomena di alam yang menjadi lokasi kajian.
4. Performa model cukup baik dalam memprediksi debit aliran langsung (*direct runoff*) dan hasil sedimen pada beberapa daerah tangkapan air yang dicobakan.

DAFTAR PUSTAKA

- Beasley, D. B., and L. F. Huggins. 1981. ANSWERS, User's Manual. Agricultural Engineering Department, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Chow, V. T., D. R. Maidment, and L. W. Mays. 1989. Applied Hydrology. Mc. Graw Hill Book Company. New York. 572p.
- De Roo, A. J. P., C. G. Wesseling, and W. P.A. Van Deursen. 2000. Physically Based River Basin Modelling Within a GIS: the LISFLOOD Model. *Hydrological Processes*, 4(11-12): 1981-1992.
- Hidayat, Y. 2001. Aplikasi Model ANSWERS dalam Memprediksi Erosi dan Aliran Permukaan di DTA. Bodong Jaya dan DAS Way Besay Hulu. Lampung Barat. Tesis Magister, Program Pascasarjana, IPB, Bogor.
- _____, Sudarmo, Murtalaksono K, dan Sutarsih. 2006. Model ANSWERS dan Pengelolaan DAS di Indonesia (Studi Kasus Sub DAS Ciliwung Hulu, DTA Bodongjaya dan Sub DAS Way Besay Hulu. *Jurnal Tanah Tropika*, Vol 11 (2): 117-123.
- Jetten, V. 2002. Limburg Soil Erosion Model (User's Manual, windows version 2x), Utrecht Center for Environment and Landscape Dynamics (www.frw.ruu.nl/lisem), 14 Maret 2004.
- Karssenberg, D., C. G. Wesseling, P. A. Burrough, and W. P. A. van Deursen. 1997. A Simplified Hydrological Runoff Model. *dalam* : www.geog.uu.nl/pcraster/runoff, 2 Desember 2023.
- _____. 2002. Building Dynamic Spatial Environmental Models. Phd Thesis de Universiteit Utrecht. Nederlands. *dalam* : www.geog.uu.nl/pcraster/runoff/, 2 Desember 2023.
- Kurnia, U. 1997. Pendugaan Erosi dengan Metoda USLE: Kelemahan dan Keunggulan. Lokakarya Penetapan Model Pendugaan Erosi Tanah, Bogor, 7 Maret 1997.
- _____, T. Budhyastoro, dan N. Suharta. 1985. Penelitian Metoda Pemetaan Erosi Potensial dan Aktual di Kabupaten Solok, Sumatera Barat. Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah. Pusat Penelitian Tanah. Bogor.
- _____, Sudirman dan N. S. Sa'ad. 1984. Pengaruh Strip Rumput dan Lamtoro terhadap Aliran Permukaan dan Erosi pada Tanah Latosol Citayam, Pengujian pada Daerah Tampung Mini. Prosiding Pertemuan Teknis Penelitian Tanah 21-23 Februari 1984. Pusat Penelitian Tanah. Bogor.

- Morris, G.L. and J. Fan. 1997. Reservoir Sedimentation Handbook. McGrawHill. New York. 765p.
- Ricardo, B. 1998. ANSWERS 2000 First Report. Dalam: www.dillaha.bse.vt.edu/answers/index.html. 20 Oktober 2003.
- Suwardjo, 1981. Peranan Sisa sisa Tanaman dalam Konservasi Tanah dan Air pada Lahan Usahatani Tanaman Semusim. Disertasi Doktor, Fakultas Pascasarjana, IPB. Bogor.
- Wischmeier, W. H and D.D. Smith. 1965. Predicting Rainfall Erosion Looses from Cropland East of The Rocky Mountains. Giude for Selection of Practices for Soil and Water Conservation. Agricultural Handbook No. 282. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture in Cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station. *dalam:* www.sedlab.olemiss, 7 November 2023.
- Wischmeier, W.H. 1976. Use and Misuse of the Universal Soil Loss Equation. Journal of Soil and Water Conservation. Vol. 31(1) : 5 – 9.
- Wischmeier, W. H and D.D. Smith. 1978. Predicting Rainfall Erosion Looses. A Giude to Conservation Planning. Agricultural Handbook No. 573. Agricultural Research Service, U.S. Department of Agriculture in Cooperation with Purdue Agricultural Experiment Station. *dalam:* (www.sedlab.olemiss). 5 Februari 2004.